

# 学 位 論 文 の 要 旨

レーザドップラ式流量計による高圧燃料噴射率計測に関する研究

Study on High Pressure Fuel Injection Rate Measurement with a Flow Rate Meter Based on Laser Doppler Anemometer

氏 名 小山 哲司 印

内燃機関の性能向上にはエンジン構成要素の制御技術の向上が必要である。例えば筒内直接噴射方式エンジンでは、燃料噴射制御が重要な役割をなす。燃料噴射制御には噴霧特性の把握が必要であり、噴霧特性に対し様々な計測結果をもとに詳細な知見の蓄積が行われているが、機関運転時の噴霧の直接評価はいまだ十分ではない。燃料噴射率は噴霧構造に影響を及ぼす重要な要素であり、噴射率と噴霧特性との関連性を把握していれば、機関運転時に噴霧特性の代わりに噴射率が利用でき噴射系の設計や制御方法の発展に寄与できると考えられる。これには、インジェクタの下流を計測しない噴射率計が必要である。噴射率は長管法噴射率計が一般的であるが、インジェクタ下流で計測する方式のため噴霧との同時評価を行うことはできない。

LDA 流量計はインジェクタ上流で計測可能な計測手法であるが一般的に装置が大きく高価であるため実験的な燃料供給システムでのみ適用されてきた。LDA 流量計による研究の推進のためには既存の燃料供給システムに組み込める小型で安価な LDA 流量計が望まれる。

本研究では高圧燃料噴射系のインジェクタ上流での燃料噴射率を計測可能な安価で単純化した LDA 流量計を製作した。製作した LDA 流量計の性能を確認するとともに、燃料加圧方式、燃料圧力、噴射時間に対する詳細な噴射率の時間履歴の違いを提供した。さらに、噴射率の時間履歴に見られる噴射弁の開閉に起因する振動から誤差要因を特定し、噴射量計測の精度向上を検討した。

LDA 流量計は半導体レーザ、光電子増倍管、周波数シフタを一体化し小型で可搬型とした。フレーム構造とすることで軽量化した上で操作性と保守性を向上させ、流速を計測する計測部の交換を容易にし、交換時の光学系の再調整作業を大幅に軽減可能な構造とした。

燃料供給装置は圧力容器内で圧縮空気により燃料を加圧する方式と高圧ポンプを用いた燃料加圧方式の 2 種類を使用した。インジェクタは直噴ガソリン機関用高圧スワールインジェクタを使用し、LDA 流量計はインジェクタの直前に設置した。インジェクタの噴射

時間と噴射周期はインジェクタ制御装置で設定した。燃料は安全性を考慮し **n-heptane** を用いた。LDA 流量計による計測のため、圧力容器にて燃料を加圧した際はトレーサ粒子を使用し、高圧ポンプによる燃料供給時では高圧ポンプの制限からトレーサ粒子を添加せずに実験を行った。

LDA 流量計の性能試験では LDA 流量計の測定管内径を変え瞬時流量への影響、燃料噴射圧変化での感度、噴射時間変化での瞬時流量の時間分解能を確認した。LDA 流量計の瞬時流量を長管法噴射率計の瞬間流量と比較し LDA 流量計の瞬時流量積算結果と電子天秤による噴射量を比較した。共通の条件として噴射周期は **200ms** 一定とした。LDA 流量計による高圧燃料噴射率の評価を行う際には、燃料噴射圧、噴射時間の条件範囲を性能試験時より拡大し詳細に調査した。

実験結果から、製作した LDA 流量計は高圧噴射システムでインジェクタ上流の瞬時流量計測が可能であった。耐圧性能は、最大 **30MPa** でありガソリンエンジンにおける高圧燃料噴射に利用可能であった。LDA 流量計の測定管内径の影響は小さく、管径により流量計測範囲が選定可能であり **1MPa** 以下の燃料圧力変化を十分評価できる時間と瞬時流量の分解能を持つことを確認した。噴射圧力、噴射時間の変化に対する燃料噴射率の微細な違いを明らかにすることができ、制作した LDA 流量計はガソリンエンジンの高圧燃料噴射計測にて十分な性能を持つことを確認した。

LDA 流量計を用いた高圧燃料噴射率評価においては、LDA 流量計の計測結果と従来の長管法の結果とを比較し噴射率と相関が取れることを示し、計測システムや燃料噴射系に依存する振動などの違いを示すことができた。今回の計測から、閉弁中でもインジェクタ上流に流動が存在することを LDA 流量計による計測結果から示すことができた。この特徴は噴霧制御の観点から利点となりうる。LDA 流量計の瞬時流量より得られた噴射量を電子天秤結果と比較したところ、インジェクタの開閉に起因する上流での瞬時流量振動が積算値計測の際の誤差要因となっていることを示した。噴霧との比較、長管法との比較のために、インジェクタの開閉弁によるインジェクタ上流の振動流は誤差要因ととらえることとした。

実際の内燃機関などの噴射系本来のインジェクタ上流の管内流体挙動の把握を目的とする LDA 流量計では、インジェクタの開閉による衝撃の影響は避けられず瞬時流量の積算結果である噴射量の誤差低減が必要である。本研究では、インジェクタの開閉衝撃に起因する振動をシステム応答として求め瞬時流量から除去する方法を試みた。システム応答を除去した瞬時流量は振動が大幅に小さくなり噴射量誤差の低減が得られた。

以上を総合して、本 LDA 流量計は今後の噴霧解析に有用な手段であることを示した。

# 学 位 論 文 の 要 旨 (英訳)

## Study on High Pressure Fuel Injection Rate Measurement with a Flow Rate Meter Based on Laser Doppler Anemometer

Tetsuji Koyama

In order to improve the performances of internal combustion engines, the control technology of their components must be improved. For example, the fuel injection control in a direct-injection engine becomes important. Understanding of the spray characteristic is requested for an advanced control of fuel injection. Although detailed knowledge is accumulated by various spray measurement results, the direct evaluation of spray characteristics under engine operating condition is not enough until now.

The fuel injection rates are an essential element related with the spray characteristics. When the relationship between the injection rate and the spray characteristic is clarified, the injection rate can be used instead of the spray characteristic during an engine operation. It contributes to a design of an injection system, or development of the control of combustion. The injection rate meter which can measure the upstream of the injector is required. The BOSCH type injection rate meter is generally used in the previous studies. A simultaneous measurement of spray characteristics and injection rate cannot be performed, because it measures at downstream of the injector.

The LDA flow rate meter can measure the flow rate at upstream of the injector. The past system is applied only for the experimental fuel-supply system due to the huge system and high cost. Small and low-cost LDA flow rate meter is desired for promotion of study with the LDA flow rate meter and the fuel-supply system for actual automobile.

An LDA flow rate meter with low-cost and simple structure has been developed for measuring a fuel injection rate in the upstream of the injector of a high pressure fuel injection system. The performances of developed LDA flow rate meter has confirmed by time series of instantaneous flow rate under the conditions of several fuel pressuring system, fuel pressure and valve opening duration. The oscillation in the instantaneous flow rate by opening and closing of a fuel injector valve causes measurement error. The accuracy of the injection rate is improved by removing the errors.

The developed LDA flow rate meter consists of a semiconductor laser, a photomultiplier, and a frequency sifter. The small and portable structure is realized by using frame-work and integrated structure. The structure presents easy replacement of the measuring part.

Two kinds of fuel-supply systems, namely, a pressure vessel (fuel is pressurized by a compressed air) and a high pressure pump, were applied. The used injector was a high pressure swirl injector for direct injection gasoline engines. The LDA flow rate meter was installed just before the injector. The injection period and injection cycle of the injector were set up with the injector controller. N-heptane was used for safety of experiments. A tracer particle was used for a pressure vessel experiment. It was not used for the high pressure pump experiments due to the limitation of the clearance of the pump.

The performance test of the LDA flow rate meter was performed under the conditions of various measurement pipe inner diameter. The influence of the pipe inner diameter on the instantaneous flow rate was clarified. The sensibility of a fuel injection pressure and the time resolution with various injection periods were evaluated. Instantaneous flow rate by the LDA flow rate meter was compared with that of the BOSCH type injection rate meter. The integral masses from the instantaneous flow rate by the LDA flow rate meter were compared with the results by the electrical mass balance. The injection cycle was set constant for 200 ms. For the high pressure fuel injection rate test, the conditions of fuel injection pressures and injection periods were expanded from the performance test.

The developed LDA flow rate meter can provide the instantaneous flow rate at the upstream of injector in a high pressure injection system. Maximum pressure of the test pipe is decided as 30 MPa from the results of pressure test., It is able to use for the high pressure fuel injection in the gasoline engine. The influence of the measurement pipe inner diameter of the LDA flow rate meter is negligible small under the present test conditions. It means the pipe diameter can be selected by measuring range. The resolutions of temporal and the instantaneous flow rate are enough to discuss the 1 MPa or less fuel pressure change. The difference in the fuel injection rate with various fuel injection pressures and injection periods can be clarified. It is confirmed that the LDA flow rate meter has sufficient performances for measuring the high pressure fuel injection system of a gasoline engine. The comparison of the high pressure fuel injection rate indicates the correlation of the results by the LDA flow rate meter and the conventional injection rate. Differences between them are caused by the oscillation depending on an instrumentation system and a fuel injection system. The BOSCH system provides no-data during injector valve closing duration because no-leakage is occurred. The LDA flow rate meter can measure the oscillating flow in the upstream of injector. The comparison between the results by the electrical mass balance and by the LDA flow rate meter shows that the oscillation in the instantaneous flow rate causes the errors. In order to discuss the correlation of a spray and instantaneous injection rate, the oscillating flow of the upstream of the injector by opening and closing of an injector is treated as error.

The purpose of the LDA flow rate meter is the measurements of the fluid behavior on the upstream of fuel injection system for application of the actual internal combustion engine. The oscillation by opening and closing of the injector valve is inevitable results due to the purpose. The accuracy of injection rate must be improved. The oscillation is treated as a system response, and it is removed from an instant flow rate. After removal of the oscillation motion, the results of the instantaneous flow rate and integrated mass become better than that before removal.

To summarize the above, this LDA flow rate meter is a useful method for the characterization of injection rate of the fuel spray.